

文章编号: 1008-2786-(2019)3-359-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000429

滇中高原主要森林土壤发生特性及系统分类

肖蒙¹, 何欢², 王莹哲¹, 熊俊芬¹, 何忠俊^{1*}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 为明确滇中高原主要森林土壤系统分类地位, 并为云南森林土壤合理利用提供科学依据, 本文以中国土壤系统分类为基础, 研究了滇中高原 8 个典型土壤的剖面特征和发生性状, 通过分析土壤发生特性, 划分其诊断层和诊断特性, 对土壤进行系统分类。结果表明: 不同土壤剖面发育层次较明显, 且均发育有淀积层, 土体颜色以暗棕色和紫色为主, 质地为偏砂质黏壤土; 砾石含量在 0.7% ~ 42.4% 之间, 粘化率在 0.53 ~ 2.56 之间, 淋溶作用较强。有机质含量在 32.87 ~ 208.14 g/kg 之间, CEC 含量在 4.75 ~ 49.36 cmol/kg 之间, 盐基离子以 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 为主, 盐基饱和度在 6.27% ~ 90.74% 之间; 铁游离度在 41% ~ 95% 之间。土壤风化程度一般, 大部分剖面处于脱硅富铁铝化阶段。8 个土壤剖面具有 2 个诊断表层、3 个诊断下层和 6 个诊断特性。8 个土壤剖面(黄棕壤、山地红壤、紫色土)在发生分类上划分为 3 个土纲分别为淋溶土、铁铝土、初育土。在土壤系统分类方案中检索出 3 个土纲, 3 个亚纲, 3 个土类, 3 个亚类, 分别为铁质干润锥形土、粘化干润富铁土、筒育干润富铁土、铁质干润淋溶土。

关键词: 滇中高原; 森林土壤; 发育特征; 诊断特性; 系统分类

中图分类号: S714.4

文献标志码: A

土壤分类是研究土壤性质的前提, 是土壤资源调查的基础, 也是土壤科学发展水平的反映^[1]。随着土壤分类方法与技术的不断更新, 土壤系统分类已经成为多个国家的重点, 其中美国成果显著, 并出版了《soil taxonomy》一书, 目前已被多个国家采用^[2-4]。中国对于土壤系统分类的研究始于 20 世纪 80 年代, 在借鉴了美国土壤系统分类的基础上建立了具中国特色的《中国土壤系统分类》^[5], 制定了高级分类检索单元, 使得土壤分类具有定量化和标准化的特点。近年来土壤系统分类方案逐渐应用于我国区域土壤的系统分类研究中, 并取得了重大

成果^[6-9], 但研究重点大部分为耕作土壤或矿质土壤^[1], 关于森林土壤系统分类的研究较少, 且多数地区对于森林土壤的划分仍建立在发生分类的基础上, 导致具体变异土壤的特性被忽略^[10], 因此迫切需要建立各地区森林土壤系统分类的基础数据库。

森林土壤是指发育在绿色植被下的土壤, 表层一般为枯枝落叶层, 有机质及矿质含量较高, 具有涵养水源、调节二氧化碳排放量的生态功能, 同时它是重要的氮素和碳素储存库, 对地表植被和生物多样性有重要的支撑作用^[11]。滇中高原属云南高原主体部分, 地况地貌复杂, 山高谷深, 森林土壤面积较

收稿日期(Received date): 2018-10-09; 改回日期(Accepted date): 2019-06-26

基金项目(Foundation item): 云南省科技厅自然科学基金面上项目(2006D0039M); 云南省第四次森林资源规划设计调查-森林土壤专业调查(00000000038-407)。[Natural Science Foundation Item of Yunnan Provincial Science and Technology Department (2006D0039M); The Fourth Survey of Forest Management Inventory in Yunnan Province-Forest Soil Survey (00000000038-407)]

作者简介(Biography): 肖蒙(1993-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事土壤分类方面的研究。[XIAO Meng(1993-), female, born in Heze, Shandong province, M. Sc. candidate, research on soil taxonomy] E-mail: 1197565129@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 何忠俊(1962-), 男, 陕西城固人, 博士, 教授, 主要从事土壤地理和药用植物营养与施肥方面的研究。[HE Zhongjun(1962-), male, born in Chenggu, Shanxi province, Ph. D., professor, specialized in soil geography, medicinal plant nutrition and fertilization] E-mail: hezhongjun@hotmail.com

大,类型多样,且成土过程易受多种因素影响,具典型垂直分布带谱^[12]。目前,已有关于滇中高原的肥力特征^[13]等的研究报道,但缺乏对该区土壤类型及系统分类地位的研究,严重制约着本区土壤资源合理利用与土壤信息的交流。因此,本文根据最新的土壤系统分类方法,以滇中地区 8 个森林土壤剖面为研究对象,研究其理化性质和成土过程,进而确定土壤诊断层和诊断特性,并与发生分类相对比,为该地区的土壤资源利用和调查规划提供详细数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇中高原主要包括云南中部和东部地区,中部地势起伏和缓,高原湖泊、盆地众多。少数因差异抬升形成的山峰,海拔多在 3000 m 以下,滇中高原的降水受西南季风的控制,具有干湿季分明,旱季较长,降雨量受海拔高度与季风气候影响明显。平均海拔 1870 m,年均温 14.8 °C, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 4574 °C,属北亚热带气候。滇中高原森林类型众多,主要森林类型为常绿阔叶林(元江栲(*Castanopsis orthacantha*))、高山栲(*C. delavayi*)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)、落叶阔叶林(旱冬瓜(*Alnus nepalensis*))、云南松林(*Pinus yunnanensis*)等,是云

南省森林生态系统的重要组成部分。该区土壤类型主要为山地红壤、紫色土、黄棕壤及少数石灰性土,成土母质为第三季末古红土、砂岩、紫色砂岩或石灰岩残积坡积物。

1.2 土壤采集与测定

采样地点主要在昆明和曲靖两个地区(图 1),海拔在 2000 ~ 2500 m 之间,挖取具代表性土壤剖面,观察并记载剖面特征和环境状况后,按照发生层采集土壤样品,样地概况见表 1。采回的土样放在无阳光直射、洁净通风的地方自然风干,过不同粒径 2 mm、1 mm、0.25 mm 筛,装入自封袋备用。

处理样品根据土壤系统分类实验室测定方法进行实验分析。主要测定指标包括:全氮、吸湿水、pH、交换性离子、有机质、机械组成、氧化铁(游离铁、络合铁、无定形铁)、土壤矿物组成(Na、K、Ti、Si 等)、以上根据《土壤农化分析》^[14]和《土壤调查实验室分析方法》^[15];土体颜色:根据《中国标准土比色卡》比色。

2 土壤发生特性

2.1 剖面特征

由表 2 可知,不同剖面发育程度不同,且发育层次较明显,除 QZ-01 剖面未发育有母质层,其他剖

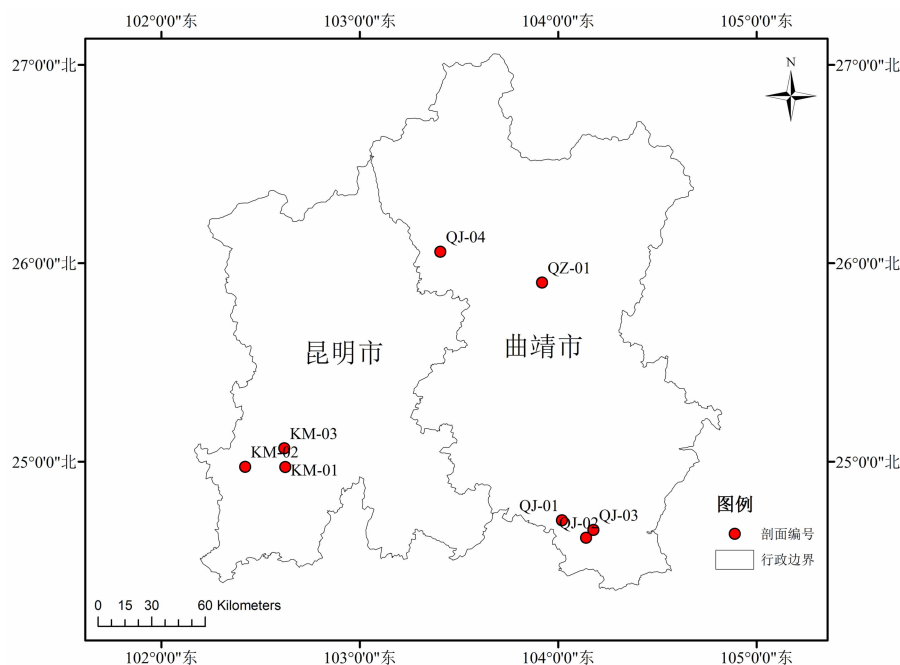


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Map of soil sampling sites

表 1 各样地概况

Tab. 1 Site conditions of sample plots

剖面编号	经度	纬度	海拔/m	母质	地形	坡度	坡向	林型	土壤	采样地
KM-01	102°37'28"	24°58'21"	2060	砂岩坡积物	中山	38°	东北	滇青冈林	山地红壤	昆明市西山公园
KM-02	102°25'22"	24°58'24"	2140	石灰岩残积坡积物	中山	20°	北	云南油杉	山地红壤	昆明市安宁市龙山区
KM-03	102°37'11"	25°04'0.25"	2220	砂岩残积坡积物	中山	28°	西北	元江栲林	山地红壤	昆明市西山区
QJ-01	104°01'8"	24°42'13"	2040	石灰岩坡积物	中山	20°	北	元江栲林	山地红壤	曲靖市色从山所依格区
QZ-01	103°55'7.9"	25°54'8.7"	2347	砂岩残积坡积物	中山	8°	北	元江栲林	黄棕壤	曲靖市沾益区大磨脚山
QJ-02	104°08'26"	24°36'57"	2107	砂岩坡积物	中山	26°	北	滇石栎林	酸性紫色土	曲靖市师宗县芹菜冲区
QJ-03	104°10'40"	24°39'18"	2140	砂岩坡积物	中山	20°	西北	锐齿榿栎林	山地红壤	曲靖市师宗县老神山
QJ-04	103°24'23"	26°3'27"	2540	石灰岩坡积物	中山	23°	东北	华山松林	黄棕壤	曲靖市会泽县赵林口子

表 2 各土壤剖面特征

Tab. 2 Soil profile of surveyed sample plots

样点	层次	厚度/cm	颜色(干)	颜色(润)	石灰反应	结 构	干湿度	松紧度
KM-01	A	0-8	暗棕 7.5YR 3.5/4.5	暗灰棕 5YR 4/2	—	团粒	潮	适中
	B	8-55	棕 7.5YR 4/6	暗棕 7.5YR 3.5/4.5	—	团块	潮	适中
	C	55-75	淡棕 7.5YR 4.5/6	棕 7.5YR 4/6	—	块	潮	松散
KM-02	A	0-35	暗红棕 5YR 2.5/5.5	暗红棕 5YR 2/4	—	团块	潮	较疏松
	B	35-65	红黄 7.5YR 6/8	红黄 7.5YR 5.5/7.5	—	块	潮	适中
	C	65-90	淡红黄 7.5YR 6.5/7.5	红棕 5YR 4.5/8	—	块	湿	适中
KM-03	A	0-20	灰黄棕 10YR 4/3	黑棕 7.5YR 2/2	—	粒	潮	适中
	B	20-45	紫 5YR 5.5/2.5	棕 7.5YR 3.5/5.5	—	块	潮	适中
	C	45-80	紫 5YR 6/3	棕 7.5YR 4/6	—	块	潮	适中
QJ-01	A	0-48	紫棕 5YR 5/4	暗红棕 5YR 3/6	—	团块	潮	松散
	B	48-100	红棕 5YR 5/8	暗红棕 5YR 3/5.5	—	块	潮	紧实
	BC	>100	紫 5YR 6/3	棕 7.5YR 4/6	—	块	潮	紧实
QZ-01	A	0-60	暗棕 7.5YR 2.5/3.5	黑棕 7.5YR 2/2	—	团块	潮	疏松
	B	60-86	暗黄棕 10YR 5.5/4.5	棕 7.5YR 4/6	—	粒礅	潮	稍紧实
QJ-02	A	0-30	暗棕 7.5YR 3/4	黑棕 7.5YR 1.5/1.5	—	粒礅	潮	适中
	B	30-80	紫棕 5YR 5/3.5	棕 7.5YR 3.5/5.5	—	块	湿	较紧实
	C	>80	紫棕 5YR 5/4	棕 7.5YR 4/6	—	块	湿	较紧实
QJ-03	A	0-30	暗棕 7.5YR 3/4	黑棕 7.5YR 1.5/1.5	—	团粒	湿	适中
	B	30-55	暗红棕 5YR 3/6.5	暗红棕 5YR 2.5/5.5	—	团块	湿	稍紧实
	C	55-80	红棕 5YR 5/8	暗红棕 5YR 3/6	—	块	湿	稍紧实
QJ-04	A	0-20	暗棕红 2.5YR 4.5/8.5	暗红 10R 2.5/6.5	—	块	潮	疏松
	B	20-45	淡黄棕 10YR 6.5/5.5	黄棕 10YR 5/8	—	块	潮	紧实
	C	45-90	淡棕 7.5YR 5/6	棕 7.5YR 4/6	—	块	潮	稍紧

面皆发育有表土层(A)、心土层(B)、母质层(C或BC),土壤剖面颜色以棕色和紫色为主,干态色调在2.5YR~10YR之间,大部分剖面色调集中在5YR和7.5YR,明度在2.5~6之间,彩度大部分在1.5~5之间,润态色调在5YR~10YR之间,大部分为7.5YR,明度在1.4~5之间,彩度在1.5~8之间,其中各剖面润态色调和明度的变化较干态变化幅度低。

2.2 颗粒组成与质地

表3表明,各剖面砂粒含量6.23%~75.27%,粉粒含量3.67%~36.06%,粘粒含量13.91%~85.53%,其中QJ-01剖面、KM-02剖面 and

QJ-04剖面粘粒含量较高,且大于砂粒与粉粒含量,其他剖面砂粒含量皆高于粉粒与粘粒。土壤粉/粘比在0.04~1.34之间,粉黏比较低,表示土壤剖面风化程度较高,且大部分剖面随着土层深度增加,粉黏比而逐渐降低。各剖面粘化率在0.53~2.56之间,其中KM-02剖面、QJ-01剖面、QJ-02剖面、QJ-03剖面 and QJ-04剖面土壤粘化率>1.20,粘粒明显在淀积层聚集,剖面淋溶现象明显,发育有粘化层。土壤质地以砂质黏壤土为主,随土壤深度增加,砂粒含量增加。各剖面砾石含量在0.7~42.4%之间,不同剖面层次之间变化幅度较大。

表3 土壤机械组成与质地

Tab.3 Soil mechanical composition and texture of different layers at different soil profiles

样点	层次	砾石含量 /%	机械组成/%			质地分类	粉/黏	粘化率
			粘粒	粉粒	砂粒			
			<0.002 mm	0.02~0.002 mm	2~0.02 mm			
KM-01	A	34.1	26.88	36.02	37.10	轻砾石土(壤质黏土)	1.34	1
	B	32.7	26.84	27.91	45.25	轻砾石土(壤质黏土)	1.04	
	C	24.3	26.93	28.01	45.06	多砾壤质黏土	1.04	
KM-02	A	1.3	29.99	26.89	43.12	少砾壤质黏土	0.90	1.99
	B	3.8	59.68	24.39	15.92	少砾黏土	0.41	
	C	10.3	53.09	31.75	15.15	多砾黏土	0.60	
KM-03	A	0.7	28.34	36.06	35.60	壤质黏土	1.27	1.17
	B	4.6	33.13	30.58	36.28	少砾壤质黏土	0.92	
	C	9.2	32.02	26.43	41.56	中砾壤质黏土	0.83	
QJ-01	A	40.9	41.06	34.39	24.55	轻砾石土(壤质黏土)	0.84	1.24
	B	34.6	50.95	18.85	30.20	轻砾石土(黏土)	0.37	
	BC	10.9	37.91	21.23	40.86	多砾壤质黏土	0.56	
QZ-01	A	3.7	26.34	13.98	59.68	少砾砂质黏土	0.53	0.53
	B	42.1	13.91	10.82	75.27	轻砾石土(砂质壤土)	0.78	
QJ-02	A	42.2	22.35	20.20	57.45	轻砾石土(砂质黏壤土)	0.90	1.29
	B	4.2	28.83	23.59	47.58	少砾壤质黏土	0.82	
	C	16.2	26.15	20.40	53.45	多砾壤质黏土	0.78	
QJ-03	A	16.7	15.11	16.73	68.15	多砾砂质黏壤土	1.11	1.49
	B	7.8	22.44	27.14	50.41	中砾黏壤土	1.21	
	C	2.7	57.60	36.16	6.23	少砾黏土	0.63	
QJ-04	A	8.4	33.32	15.07	51.61	中砾壤质黏土	0.45	2.56
	B	1.1	85.53	3.67	10.79	少砾重黏土	0.04	
	C	0.5	75.42	16.88	7.70	重黏土	0.22	

41% ~95% 之间,活化度在1.08% ~45.69% 之间。剖面 KM-03、QJ-01、QJ-02、QJ-03 全铁含量表现出 B 层稍大于 A 层的趋势,说明氧化铁有向 B 层富集的趋势,其余剖面全铁含量在表层聚集。对比大部分剖面 B 层游离铁含量高于 20 g/kg,且游离度均高于 40%,达到了铁质特性的标准。

其中游离铁的含量越高,游离度越大,表示土壤风化程度较高,发育较完全^[16]。剖面 KM-03 和 QZ-01 的游离铁含量较低,B 层游离铁含量最低为 14.87 g/kg,游离度在 58% ~95% 之间,活化度在 23.68% ~33.07% 之间,与其他剖面相比差异较大,土壤发育程度较弱。KM-02、QJ-01剖面游离铁含

量最高,活化度较小,发育较好。络合铁 0.06 ~ 3.47 g/kg之间,络合度在 2.67% ~45.69% 之间,除 QJ-01 剖面以外其他均呈现上层大于底层现象,这是由于上层有机质含量高于下层。其中剖面 KM-03 和 QZ-01 的表层络合铁含量最高达 3.08 g/kg,络合度最高为 19.63%,与其他剖面具有较大的差异。各供试剖面母质类型与成土环境相似,土壤氧化铁变化规律不明显。

2.5 土壤化学组成与分子比率

各剖面土壤化学组成如表 6。土壤矿质元素含量以 SiO₂、Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 所占比例最大,为土壤主要的骨干成分,其中的含量最高,SiO₂约占土壤矿

表 5 土壤氧化铁形态特征
Tab.5 Morphological characteristics of iron oxides of different soil profiles

样点	层次	全铁 Fet /(g · kg ⁻¹)	游离铁 Fed /(g · kg ⁻¹)	活性铁 Feo /(g · kg ⁻¹)	络合铁 Fep /(g · kg ⁻¹)	游离度 Fed /Fet/%	络合度 Fep /Fed/%	活化度 Feo /Fed/%
KM-01	A	91.40	57.86	14.96	1.89	63.30	3.27	16.36
	B	82.65	59.52	14.93	0.57	72.02	0.95	18.06
	C	93.66	60.43	15.03	0.28	64.52	0.47	16.05
KM-02	A	112.89	60.22	11.34	0.40	53.35	0.66	10.04
	B	109.59	59.12	6.09	0.15	53.95	0.25	5.55
	C	108.32	60.91	5.94	0.06	56.23	0.10	5.49
KM-03	A	25.74	24.54	8.11	3.08	95.00	12.57	33.07
	B	41.74	24.17	5.93	1.07	58.00	4.44	24.55
	C	31.31	23.20	5.49	1.02	74.00	4.39	23.66
QJ-01	A	121.77	49.72	7.15	0.26	41.00	0.53	14.39
	B	126.22	55.10	7.00	1.62	44.00	2.94	12.70
	BC	103.69	56.42	1.51	0.06	54.00	0.11	2.67
QZ-01	A	25.01	23.72	7.74	2.98	95.00	12.55	32.62
	B	19.99	14.87	6.79	2.92	74.00	19.63	45.69
QJ-02	A	104.79	54.26	13.10	3.24	51.78	3.10	12.50
	B	175.24	56.75	7.35	1.20	32.38	0.68	4.19
	C	172.55	56.74	6.30	0.46	32.89	0.26	3.65
QJ-03	A	99.79	55.90	15.23	3.47	56.02	3.47	15.27
	B	129.85	57.08	14.95	3.20	43.96	2.47	11.51
	C	135.54	55.57	6.33	1.31	41.00	0.97	4.67
QJ-04	A	178.72	55.65	10.12	0.53	31.14	0.30	5.66
	B	154.25	57.07	1.67	0.06	37.00	0.04	1.08
	C	181.30	57.94	2.87	0.26	31.96	0.14	1.58

质部分的 50% ~ 80%, 其含量在 265. 25 ~ 852. 37 g/kg 之间, Al_2O_3 次之, 介于 48. 88 ~ 390. 88 g/kg, 占比 5%~40%, 最后为 Fe_2O_3 , 含量在 19. 99 ~ 181. 30 g/kg 之间, 占比 2%~20%, Na_2O , TiO_2 和 K_2O 含量较低仅占一少部分比例。

土壤的硅铝率(Sa)和硅铝铁率(Saf)变化能够说明铁、铝等物质及粘粒的迁移和累积情况^[17]。其中剖面 KM - 01、KM - 02、QJ - 01、QJ - 02、QJ - 03、QJ - 04 的分子比率较低, 硅铝率(Sa)为 0. 85 ~ 3. 08, 硅铝铁率(Saf)为 0. 57 ~ 1. 87, 且剖面各层间分子比率变化不大, 表明该两个剖面风化程度较强, 开始进入脱硅中期的富铝化阶段; 而

剖面 KM - 03、QZ - 01 硅铝率(Sa)在 7. 96 ~ 14. 11 之间, 硅铝铁率(Saf)5. 97 ~ 10. 60, 风化程度一般, 处于脱硅初期的富铁化阶段。与不同剖面所处的成土母质及环境有很大的关系。

3 土壤系统分类

3.1 诊断表层

3.1.2 暗瘠表层

剖面 KM - 02、KM - 03, QJ - 01、QJ - 02、QJ - 03、QJ - 04, QZ - 01 表层厚度均 ≥ 20 cm; 土壤剖面的彩度和明度低, 搓碎土壤的润态明度 < 3. 5,

表6 土壤的化学全量组成
Tab.6 Chemical composition of the soils

剖面	层次	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	TiO_2	K_2O	硅铝率	硅铝铁率
		$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$	(Sa)	(Saf)
KM - 01	A	353. 30	91. 40	252. 09	4. 80	14. 06	5. 72	1. 40	1. 03
	B	326. 84	82. 65	179. 55	4. 06	14. 86	5. 41	1. 82	1. 25
	C	360. 19	93. 66	185. 89	3. 80	16. 52	1. 89	1. 94	1. 29
KM - 02	A	265. 25	112. 89	311. 83	3. 55	16. 53	5. 22	0. 85	0. 62
	B	320. 28	109. 59	162. 63	3. 67	23. 20	9. 47	1. 97	1. 18
	C	311. 32	108. 32	307. 83	3. 40	24. 12	8. 42	1. 01	0. 75
KM - 03	A	658. 56	25. 74	82. 04	3. 69	1. 75	1. 76	8. 03	6. 11
	B	767. 33	41. 74	84. 41	2. 69	1. 88	2. 26	9. 09	6. 08
	C	746. 95	31. 31	93. 80	2. 96	5. 10	2. 26	7. 96	5. 97
QJ - 01	A	456. 96	121. 77	248. 42	2. 79	11. 18	1. 94	1. 84	1. 23
	B	524. 99	126. 22	169. 99	4. 01	12. 52	2. 46	3. 09	1. 77
	BC	525. 55	103. 69	177. 46	4. 23	13. 11	4. 25	2. 96	1. 87
QZ - 01	A	657. 95	25. 01	48. 88	2. 67	1. 99	2. 13	13. 46	8. 90
	B	852. 37	19. 99	60. 40	3. 42	1. 22	1. 75	14. 11	10. 60
QJ - 02	A	276. 59	104. 79	221. 44	3. 20	9. 11	5. 97	1. 25	0. 85
	B	324. 24	175. 24	390. 88	3. 90	13. 40	10. 95	0. 83	0. 57
	C	335. 62	172. 55	108. 83	3. 82	12. 30	12. 28	3. 08	1. 19
QJ - 03	A	377. 37	99. 79	108. 73	3. 63	7. 49	2. 93	3. 47	1. 81
	B	413. 78	129. 85	248. 04	2. 83	9. 94	3. 11	1. 67	1. 09
	C	397. 99	135. 54	248. 56	3. 13	11. 09	4. 39	1. 60	1. 04
QJ - 04	A	311. 78	178. 72	143. 55	3. 34	15. 28	3. 14	2. 17	0. 97
	B	331. 56	154. 25	385. 05	3. 00	22. 84	0. 75	0. 86	0. 61
	C	318. 26	181. 30	218. 11	2. 09	20. 73	1. 30	1. 46	0. 80

干态明度 < 5.5 , 润态彩度 < 3.5 ; 有机碳的含量均 $\geq 6 \text{ g/kg}$, 土壤结构发育稍差, 该 4 个剖面从厚度、颜色、盐基饱和度均符合暗瘠表层的指标, 即 7 个剖面均为暗瘠表层。

3.1.3 淡薄表层

剖面 KM-01 颜色与有机碳含量与暗瘠表层符合, 厚度较低, 为淡薄表层。

3.2 诊断表下层

3.2.1 雏形层

KM-03 剖面和 QZ-01 剖面风化成土过程中基本无粘粒淀积, 未发生明显粘化, 不符合粘化层的诊断指标, 带有紫、棕和灰棕色, 且有土壤发育的淀积层, 厚度均小于土层厚度的 50%, 不符合其他诊断表下层的条件, 属于雏形层。

3.2.2 粘化层

剖面 KM-02、QJ-01、QJ-02、QJ-03、QJ-04 淀积层粘粒含量增高, 厚度 $\geq 15 \text{ cm}$, 质地为壤质黏土, 松紧度适中, 剖面上下层粘率比 ≥ 1.2 , 符合粘化层指标, 属于粘化层。

3.2.3 低活性富铁层

剖面 KM-01、KM-02 和剖面 QJ-01、QJ-02 诊断表下层厚度 $\geq 30 \text{ cm}$, 土壤质地较细, 润态颜色色调为 7.5YR, 游离铁含量 $\geq 20 \text{ g/kg}$, 且占全铁含量的百分比 $\geq 40\%$, 阳离子交换量 $< 24 \text{ cmol/kg}$, 属于低活性富铁层。

3.3 诊断特性

3.3.1 土壤水分状况

根据各剖面所处地点年降雨量与蒸发量状况^[18], 结合 Penman 经验公式 $D = Et/P$ 估算各地干燥度, 其中 D 为干燥度, Et 为年潜在蒸散量, P 为年降水量, 8 个剖面皆属半干润土壤水分状况。

3.3.2 土壤温度状况

根据气候资料估算土壤温度(土表至石质面 50 cm), 又因为实际情况难测, 可根据年平均气温(x)和年/夏季平均土壤温度(y)之间存在回归方程: $Y = 2.9001 + 0.9513X$ (相关系数: $r = 0.9889$) 来计算得 KM-03 剖面、QJ-04 剖面和 QZ-01 剖面年均温 $> 8^\circ\text{C}$ 而 $< 15^\circ\text{C}$, 属温性土壤, 其他剖面 $> 15^\circ\text{C}$ 而 $< 22^\circ\text{C}$, 属热性土壤。

3.3.3 腐殖质特性

热带亚热带地区中土壤中 A 层腐殖质含量较

高, 并且向底层逐渐减少, B 层由腐殖质的淋溶淀积积累的特性, 土壤总有机碳储量(土表至 100 cm) $\geq 12 \text{ kg/m}^2$ 。8 个剖面中除剖面 QJ-04 总有机碳储量 $\leq 12 \text{ kg/m}^2$, 其他剖面均符合腐殖质特性。

3.3.4 铁质特性

土壤色调为 $\geq 5\text{YR}$, 整个淀积层细土游离铁含量 $\geq 20 \text{ g/kg}$ 或占全铁的 40% 更多。8 个剖面均具有铁质特性。

3.3.5 盐基饱和度

KM-03 剖面的上层盐基饱和度 $\leq 50\%$, 下层较大, 属于盐基上层不饱和和下层饱和, 剖面 QZ-01、QJ-03、QJ-04 属盐基不饱和。剖面 KM-01、KM-02、QJ-01 盐基饱和度 $\geq 35\%$, 属富盐基, QJ-02 剖面盐基饱和度 $\leq 35\%$, 属贫盐基。

3.4 土壤剖面归属

按中国土壤系统分类指标, 将土壤剖面所具有的诊断层和诊断特性分别列于表 7。并根据表中诊断层和诊断特性, 按照文献[19]和[5]进行检索命名, 并与我国发生学命名对比。

检索时, 按照检索顺序自上而下按照土纲—亚纲—土类—亚类依次检索, 具有某诊断层或诊断特性的全部土壤首先被检出, 并按照后检土壤剖面不具该剖面特征的原则进行检索。如剖面 QJ-03, 依照《中国土壤系统分类检索(第三版)》土纲的检索顺序, 其含有粘化层或黏磐, 而不含有其他土壤诊断层或诊断特性, 因此检索为淋溶土纲, 在对淋溶土亚纲的检索中, 其诊断层或诊断特性中含有半干润土壤水分状况, 因此, 检索为干润淋溶土亚纲, 在对土类和亚类的检索中, 其具有铁质特性和其他性质, 最终检索为普通铁质干润淋溶土。其他剖面检索具体结果列于表 8。

结果显示, KM-03 剖面和 QZ-01 剖面具有雏形层且具有铁质特性, pH 值小于 5.5, 因此检索为酸性铁质干润雏形土, 在发生分类上该两个剖面皆被命名为山地红壤和黄棕壤。QJ-01 剖面具低活性富铁铝层且具有粘化层, 检索为普通粘化干润富铁土, 发生学命名为山地红壤。KM-02、QJ-02 剖面具粘化层与低活性富铁铝层, 检索为粘化干润富铁土。KM-01 剖面则为普通筒育干润富铁土, QJ-03、04 具粘化层与铁质特性, 检索为普通铁质干润淋溶土, 发生学分类分别为山地红壤和黄棕壤。

表 7 各土壤剖面所具诊断特征

Tab. 7 The diagnostic horizon and diagnostic characteristics of tested soil profiles

剖面号	海拔/m	暗瘠 表层	淡薄 表层	雏形层	粘化层	低活性 富铁层	土壤水 分状况	土壤温 度状况	腐殖质 特性	铁质 特性	盐基饱和度
KM-01	2060	-	+	-	-	+	半干润	热性	+	+	富盐基
KM-02	2140	+	-	-	+	+	半干润	热性	+	+	富盐基
KM-03	2220	+	-	+	-	-	半干润	温性	+	+	表层不饱和和下层饱和
QJ-01	2040	+	-	-	+	+	半干润	热性	+	+	富盐基
QZ-01	2347	+	-	+	-	-	半干润	温性	+	+	不饱和
QJ-02	2107	+	-	-	+	+	半干润	热性	+	+	贫盐基
QJ-03	2140	+	-	-	+	-	半干润	热性	+	+	不饱和
QJ-04	2540	+	-	-	+	-	半干润	温性	-	+	不饱和

表 8 供试土壤剖面分类归属对比

Tab. 8 The comparison between genetic and taxonomy classification of soil profiles

剖面号	中国土壤系统分类检索				发生分类
	土纲	亚纲	土类	亚类	
KM-01	富铁土	干润富铁土	筒育干润富铁土	普通筒育干润富铁土	山地红壤
KM-02	富铁土	干润富铁土	粘化干润富铁土	普通粘化干润富铁土	山地红壤
KM-03	雏形土	干润雏形土	铁质干润雏形土	酸性铁质干润雏形土	山地红壤
QJ-01	富铁土	干润富铁土	粘化干润富铁土	普通粘化干润富铁土	山地红壤
QZ-01	雏形土	干润雏形土	铁质干润雏形土	酸性铁质干润雏形土	黄棕壤
QJ-02	富铁土	干润富铁土	粘化干润富铁土	普通粘化干润富铁土	酸性紫色土
QJ-03	淋溶土	干润淋溶土	铁质干润淋溶土	普通铁质干润淋溶土	山地红壤
QJ-04	淋溶土	干润淋溶土	铁质干润淋溶土	普通铁质干润淋溶土	黄棕壤

4 讨论

土壤的发生存在严格地理分布规律,同时在不同海拔高度的特定条件下又具有跨地带、呈组合分布的特点^[20]。在中国土壤系统分类下,滇中高原森林土壤垂直带为:富铁土(2000~2100)—淋溶土/雏形土(2100~2300)—淋溶土(2500),与同纬度下陈建飞等^[9]对福建山地土壤垂直带(富铁土—淋溶土—雏形土)的研究结果不一致,受水平地带性影响,土壤水分状况为半干润水分状况,较同纬度下山地土壤^[16]干燥。砾石含量的大小反映了土壤

的风化程度,供试土壤砾石含量在 0.5%~42.2% 之间,不同剖面之间差异较大,且砾石含量较高的发生层为供试剖面的表层,约 8~48 cm,可能是海拔较高导致土壤风化程度较低,砾石含量较高。同时,母质是影响砾石含量的主要因素,供试剖面发育母质为石灰岩和砂岩坡积物,发育在石灰岩母质上的土壤剖面粘粒含量较大,高于砂岩坡积物母质的土壤剖面,主要因为不同母质风化程度不同,形成土壤质地为砂质黏壤土。同时,对于土壤氧化铁含量及游离度有很大的影响,多数剖面游离铁含量较高,游离度较大,反映了风化程度较高,多数剖面处于脱硅富铝化中期阶段。

在对比土壤发生分类与系统分类两种分类系统之后,结果显示,同种土类可在系统分类中检索出不同土纲,可以看出两种系统具有明显的差异性,如剖面 KM-01、KM-03 在发生分类中为山地红壤,但在土壤系统分类中检索为不同的两个土纲。参照我国土壤地理发生与系统分类近似参比,分类结果大致吻合,但土壤系统分类具有更直观、更精确的优点。剖面 QZ-01 发育有 A-B 层,粘粒含量由表层向下减少,B 层粘化率仅为 0.53,在发生学分类中,仅根据土体颜色、质地及分布地等定义为黄棕壤,属淋溶土纲,易与其他相同土类不同属性的土壤混淆,在土壤系统分类下根据土壤水分状况、游离度等检索为酸性铁质干润雏形土,可以更直观地了解土壤的详细信息。在山地条件下,土壤发育过程受地形和母质的因素,具有典型的粗骨性和幼年性,不发育有典型的粘化层,因此划分为雏形土纲比较合理。同一海拔下,剖面 KM-02 和 QJ-03 分别检索为普通粘化干润富铁土和普通铁质干润淋溶土,在分类过程中,剖面 QJ-03 淀积层发育厚度为 $25 \leq 30$ cm 而不符合低活性富铁层的条件,被划分为淋溶土纲。

5 结论

不同剖面诊断出具有 2 个诊断表层,3 个诊断表下层,6 个诊断特性,其中 8 个剖面均具有铁质特性,水分状况均为半干润状况,温度状况为热性或温性。根据中国土壤系统分类将 8 个剖面归为 3 个土纲,3 个亚纲,4 个土类,4 个亚类。研究区域滇中高原垂直带谱结构从低海拔到高海拔为:干润富铁土—干润雏形土—干润淋溶土。与发生分类对比,有一定的差异,但大致结果吻合,相比较之下,土壤系统分类更直观、更方便的反映出了各个土壤剖面的功能和应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 曲潇琳,龙怀玉,谢平,等. 宁夏中部地区典型灰钙土的发育特性及系统分类研究[J]. 土壤学报,2018, **55**(1): 1-13. [QU Xiaolin, LONG Huaiyu, XIE Ping, et al. Genetic characteristics and classification of typical sierozem in central Ningxia, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(1): 1-13]
- [2] GALBRAITH J M. Human-altered and human-transported (HAHT) soils in the US soil classification system[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, **64**(2, SI): 190-199.
- [3] DITZLER C A, AHRENS R J. Development of soil taxonomy in the United States of America[J]. Eurasian Soil Science, 2006, **39**(2): 141-146.
- [4] ZÁDOROVÁ T, PENÍŽEK V. Problems in correlation of Czech national soil classification and World Reference Base 2006[J]. Geoderma, 2011, **167**: 54-60.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类组,中国土壤系统分类课题协作组. 中国土壤系统分类检索:第3版[M]. 合肥:中国科技大学出版社,2001:1-275. [Chinese Soil Taxonomic Classification Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese soil taxonomy (In Chinese): 3rd ed [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001:1-275]
- [6] 张楚,袁大刚,宋易高,等. 川西地区具有有机土壤物质特性土壤的系统分类[J]. 土壤学报,2018(5):1-12. [ZHANG Chu, YUAN Dagang, SONG Yigao, et al. Taxonomy of soils featuring organic soil materials in West Sichuan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018(5):1-12]
- [7] 顾也萍,刘付程. 皖南紫红色砂岩石上发育土壤的系统分类研究[J]. 土壤学报,2007, **5**(5): 776-783. [GU Yeping, LIU Fucheng. Taxonomic classification of soils derived from purple red sand rocks in south Anhui province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **5**(5): 776-783]
- [8] 曲潇琳,龙怀玉,曹祥会,等. 宁夏山地土壤的发育规律及系统分类研究[J]. 土壤学报,2019, **56**(1): 65-77. [QU Xiaolin, LONG Huaiyu, CAO Xianghui, et al. Development rules and taxonomy of the soil in Helan and Liupan Mountains of Ningxia province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(1): 65-77]
- [9] 陈健飞. 福建山地土壤的系统分类及其分布规律[J]. 山地学报, 2001, **19**(1):1-8. [CHEN Jianfei. Classification and distribution of mountainous soils in Fujian province based on Chinese Soil taxonomy[J]. Mountain Research, 2001, **19**(1): 1-8]
- [10] 丛高,张志丹,张晋京,等. 长白山不同林型土壤有机碳特征[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(3):179-184,191. [CONG Gao, ZHANG Zhidan, ZHANG Jinjing, et al. Research on characteristics of soil organic carbon in different forest types in Changbai Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(3):179-184,191]
- [11] 吴晋霞,王艳霞,陈奇伯,等. 滇中高原不同林龄云南松林土壤理化性质研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2014, **29**(5):740-745. [WU Jinxia, WANG Yanxia, CHEN Qibo, et al. Study on soil physical and chemical properties of different forest age of pinus yunnanensis forest in central Yunnan plateau[J]. Journal of

- Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2014, **29**(5): 740 – 745]
- [12] 杨媛媛, 陈奇伯, 黎建强, 等. 滇中高原华山松植物多样性与土壤生物肥力特征[J]. 土壤, 2017, **49**(1): 90 – 96. [YANG Yuanyuan, CHEN Jibai, LI Jianqiang, et al. Vegetation diversity and soil biological fertility of *Pinus armandii* in central Yunnan plateau, China[J]. Soils, 2017, **49**(1): 90 – 96]
- [13] 杨承栋. 森林土壤学科研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2008(5): 881 – 891. [YANG Chengdong. Advances in and prospects of forest research[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008(5): 881 – 891]
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 32 – 215. [LU Rukun. Methods of soil and agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 32 – 215]
- [15] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 2 – 198. [ZHANG Ganlin, GONG Zitong. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012: 2 – 198]
- [16] 冯跃华, 张杨珠, 邹应斌, 等. 井冈山土壤发生特性与系统分类研究[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 18 – 27. [FENG Yuehua, ZHANG Yangzhu, ZOU Yingbin, et al. Genetic characteristics and taxonomy of soils in the Jinggangshan Mountains [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(5): 18 – 27]
- [17] 崔英, 常庆瑞, 李芸, 等. 太白山南坡低山区土壤特性与系统分类[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003(3): 112 – 116. [CUI Ying, CHANG Qingrui, LI Yun, et al. Genetic characteristics and taxonomy of low zone soils on the southern slope of the Taibai Mountain [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2003(3): 112 – 116]
- [18] 黄英, 王宇. 云南省蒸发量时空分布及年际变化分析[J]. 水文, 2003, **23**(1): 36 – 40. [HUANG Ying, WANG Yu. Analysis on temporal and spatial distribution and inter-annual change of the evaporation capacity in Yunnan province[J]. Hydrology, 2003, **23**(1): 36 – 40]
- [19] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1 – 375. [GONG Zitong. Chinese Soil Taxonomy: Principles, Methodology and Application [M]. Beijing: Science Press, 1999: 1 – 375]
- [20] 龚子同, 黄荣金, 张甘霖. 中国土壤地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 78 – 89. [GONG Zitong, HUANG Rongjin, ZHANG Ganlin. Chinese Soil Geography [M]. Beijing: Science Press, 2014: 78 – 89]

Genetic Properties and Taxonomy of Forest Soil in Central Yunnan Plateau

XIAO Meng¹, HE Huan², WANG Yingzhe¹, XIONG Junfen¹, HE Zhongjun^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China;

2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to definite the taxonomic status of forest soils in central Yunnan Plateau, as well as provide scientific basis for rational utilization forest soils in Yunnan Province, the profile characteristics and genetic properties of eight soil profiles in Central Yunnan Plateau were studied based on Chinese Soil Taxonomy. In this paper, the soil genetic characteristics were analyzed, and the diagnostic horizon and diagnostic characteristics were divided, and soils were systematically classified. The results showed that the main soil layer (including illuvium horizon) was well-developed, and the color of the soil was dark brown and purple, and the soil texture was sandy clay loam, the gravel content and the argillic rate was ranged from 0.7% to 42.4% and 0.53 to 2.56 respectively, indicating that the leaching action was stronger. The content of soil organic matter ranged from 32.87 to 208.14 g/kg and soil CEC ranged from 4.75 to 49.36 cmol/kg, the main exchangeable bases ions were Ca^{2+} and Mg^{2+} and the base saturation ranged from 6.27% to 90.74%; The Fe_d/Fe_t ranged from 41% to 95%. The soil has moderately weathering and most of the profiles were developed in the stages of desilicication. The eight soils had

two diagnostic surface horizons, three diagnostic subsurface horizons and six diagnostic characteristics. In the soil genetic classification, the eight soils (yellow brown soil, mountain red soil, purple soil) were divided into three soil orders: alfisols, pedalfer and primary soil. While in the taxonomy, the eight soils were divided into three soil orders, three soil suborders, four soil groups and four soil subgroups. They were respectively Fer-ustic Cambisols, Arg-ustic Ferrisols, Hap-ustic Ferrisols, Fer-ustic Luvisols.

Key words: Central Yunnan Plateau; forest soil; developmental characteristics; diagnostic characteristics; Chinese soil Taxonomy

宝塔山——陕西省延安市革命圣地的象征

(张茂省, 中国地质调查局西安地质调查中心)

延安市是中国革命圣地,地处陕北黄土高原腹地,区内沟壑纵横,地形起伏大,城市空间限制在狭窄的川道之内,地表空间严重短缺,宝塔山是民众游览延安的必去之地,然而其位于延安市“三川”交叉东南处,山体四周沟谷深切,交通极为不便,停车困难,且周边的黄土斜坡还面临滑坡、崩塌等地质灾害的破坏。如何发挥特殊的地形地貌与地质环境条件优势,开发地下空间资源,规避地质灾害成为目前迫切需要解决的问题,提出的“垂向地下+侧向山体”地下空间组合开发利用模式,或可为山区同类城市地下空间开发利用提供借鉴。

详见本期《山区城市地下空间资源评价与开发利用模式——以延安市为例》一文。